

Бессонов А.А., Дергобузов К.А.

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА В ОПТИКЕ

Bessonov A.A., Dergobuzov K.A.

STUDY IN OPTICS ZEEMAN EFFECT

baa@csu.ru

Челябинский государственный университет

г. Челябинск



НОТВ-2014

Рассматривается лабораторная работа по изучению эффекта Зеемана в лаборатории оптики, поставленная на основе разработанной авторами компьютерной модели.

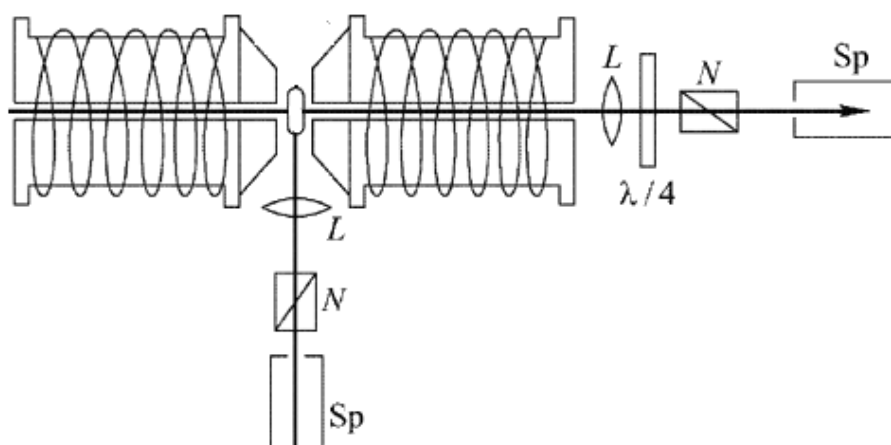
We consider the lab to study the Zeeman effect in the optics laboratory, delivered on the basis of the authors' computer model.

Краткая теория

Долгая традиция изучения влияния магнитного поля на свет, испускаемый атомами, восходит к Майклу Фарадею. Один из последних его опытов (1862 г.) состоял в наблюдении спектра паров натрия, помещенных между полюсами электромагнита, при включении и выключении поля. Отсутствие какого бы то ни было эффекта объясняется, как мы теперь знаем, недостаточностью технических средств, которыми располагал Фарадей (малая разрешающая способность спектрального аппарата при слабых магнитных полях, применявшихся им).

В конце XIX столетия Питер Зееман решил провести серию опытов и проверить, обладают ли атомы магнитными свойствами. Ученый поместил крошечный образец натрия между полюсами регулируемого электромагнита и стал изучать влияние магнитного поля на спектральные линии излучения атомов натрия. Выяснилось, что при усилении магнитного поля спектральные линии в каждой группе частот размываются, то есть в них появляются новые частоты излучения. Так было впервые однозначно подтверждено существование эффекта, который впоследствии будет назван эффектом Зеемана.

Расположение приборов в установке Зеемана и в установке Фарадея было в принципе одинаково. В дальнейших опытах, однако, было осуществлено важное дополнение. Зееман, кроме наблюдения за изменением частоты спектральных линий, обратил также внимание на характер поляризации этих линий в соответствии с указаниями Лоренца, развивавшего одновременно электронную теорию оптических явлений. Схема установки Зеемана изображена на рис. 1. Между полюсами сильного электромагнита, способного обеспечить однородное поле в 1.0—1.5 Тл, располагается источник линейчатого спектра, например газоразрядная трубка или



вакуумная дуга.

Рис. 1. Схема изучения эффекта Зеемана

Сердечник электромагнита просверлен, чтобы обеспечить наблюдения не только поперек магнитного поля (поперечный эффект), но и вдоль него (продольный эффект). Свет посылается в спектральный аппарат Sp большой разрешающей силы (около 100 000), например дифракционную решетку или интерференционный спектроскоп. На пути луча помещаются приспособления, позволяющие анализировать характер поляризации излучаемого света (линза L, анализатор N и пластинка в 1/4 волны). Поляризатором света служит само магнитное поле.

Результаты эксперимента

Результаты, получаемые из эксперимента для простых спектральных линий, например некоторых линий излучения H, Zn, Cd, сводятся к

следующему (рис. 2). Линия, имеющая в отсутствие магнитного поля частоту ν , в магнитном поле представляется при поперечном наблюдении триплетом с частотами $\nu + \Delta\nu$, ν и $\nu - \Delta\nu$, причем крайние линии поляризованы так, что колебания в них перпендикулярны направлению магнитного поля (σ -компоненты), а поляризация средней линии соответствует колебаниям вдоль магнитного поля (π -компонента). По интенсивности π -компонента в два раза сильнее, чем каждая из σ -компонент, равных между собой.

При продольном наблюдении линии наблюдаются в виде дублета с частотами $\nu - \Delta\nu$ и $\nu + \Delta\nu$, причем первая линия поляризована по левому кругу, вторая – по правому; Величина смещения $\Delta\nu$ во всех случаях пропорциональна индукции магнитного поля. Поляризованные по кругу компоненты при продольном эффекте по интенсивности совпадают с π -компонентой при поперечном.

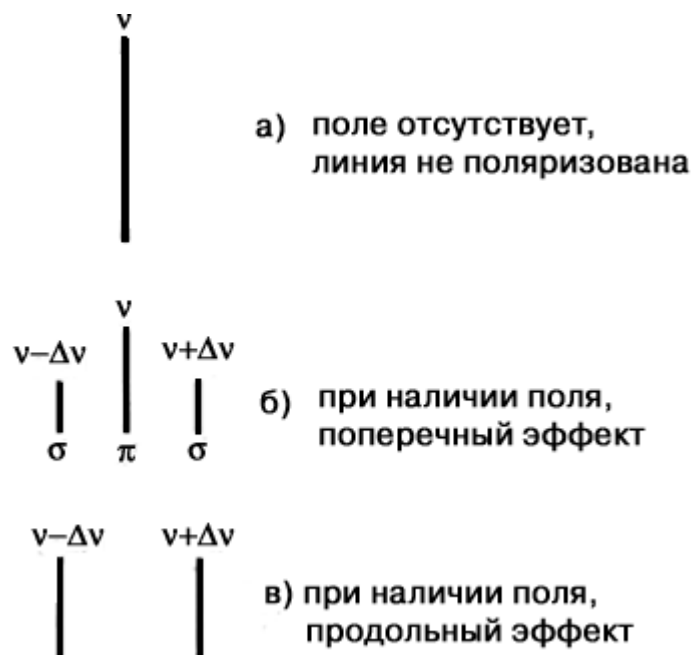


Рис. 2. Схематическое изображение простого (нормального) эффекта Зеемана

Элементарная теория эффекта Зеемана

Теория Лоренца предполагает, что оптические процессы в атоме обусловлены движением электронов. Излучение монохроматического света при этом рассматривается как результат движения электрона по простому гармоническому закону, т. е. под действием квазиупругой силы, а изменение

излучения под влиянием магнитного поля – как следствие изменения движения электрона добавочной силой, с которой магнитное поле воздействует на движущийся заряд. При наложении внешнего магнитного поля на движущийся электрон действует добавочная сила Лоренца, равная

$$\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (1)$$

где e – заряд электрона; v – скорость его движения; $B = \mu_0 H$ – магнитная индукция.

Разложим колебательное движение электрона с частотой ν и амплитудой \vec{E}_0 на два линейных гармонических колебания по двум взаимно перпендикулярным направлениям, т.е. со сдвигом фаз $\pi/2$ (рис. 3). Пусть первое из них \vec{E}_1 совершается вдоль налагаемого внешнего магнитного поля \vec{B} , а другое \vec{E}_2 — перпендикулярно направлению магнитного поля \vec{B} .

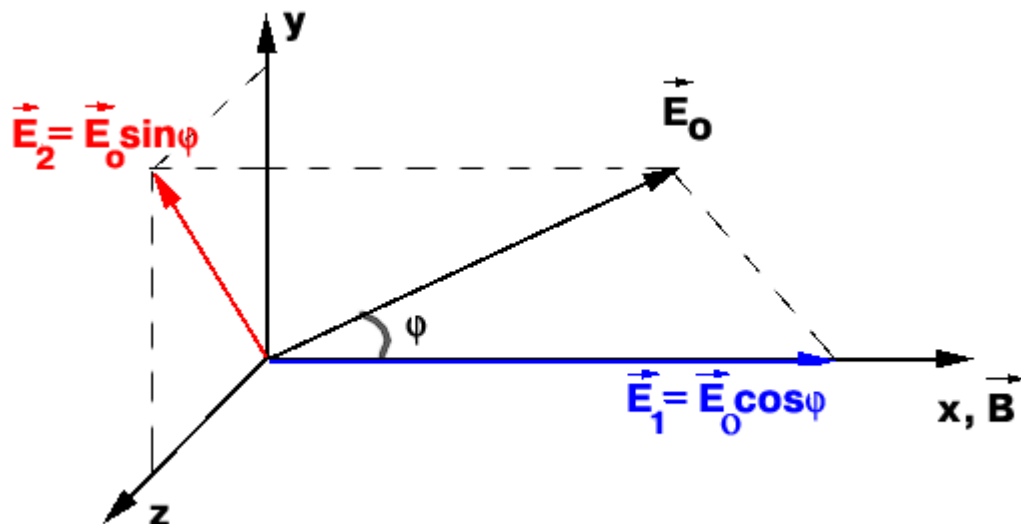


Рис. 3. Разложение движения электрона на два линейных колебания

Теперь представим линейное колебание \vec{E}_2 двумя круговыми равномерными движениями, правым и левым (рис. 4).

Магнитное поле на первую компоненту \vec{E}_1 не действует, так как $\sin(\vec{v}, \vec{B}) = 0$. Действие же поля на круговые компоненты сведется к добавочной силе Лоренца (рис. 4, отрицательный заряд). Сила Лоренца перпендикулярна

к плоскости (\vec{v}, \vec{B}) и направлена вдоль радиуса круговой траектории к центру или в противоположную сторону, в зависимости от знака заряда e и соотношения направлений v и B (рис. 4).

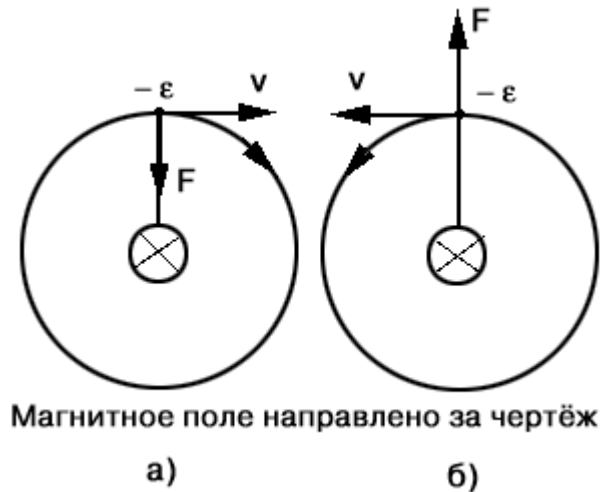


Рис. 4. К элементарной теории эффекта Зеемана

Таким образом, колебательное движение вдоль поля остается неизменным и продолжает происходить с первоначальной частотой ν . Движение же по кругам под действием поля приобретает большую $(\nu + \Delta\nu)$ или меньшую $(\nu - \Delta\nu)$ частоту в зависимости от того, увеличивает ли поле центростремительную силу, действующую на заряд (см. рис. 4, а), или уменьшает ее (см. рис. 4, б).

В соответствии с этим и излучение заряда, выполняющего такое усложненное движение, становится более сложным: его можно представить как совокупность трех монохроматических излучений различной частоты $(\nu - \Delta\nu, \nu, \nu + \Delta\nu)$, которые можно разделить при помощи соответствующего спектрального аппарата.

Поэтому в направлении, перпендикулярном к магнитному полю, спектральный аппарат обнаружит первоначальную частоту ν , соответствующую колебанию заряда параллельно магнитному полю, т.е. излучение, представляющее собой π -компоненту. Два других излучения с частотами $\nu + \Delta\nu, \nu - \Delta\nu$ соответствуют колебанию зарядов перпендикулярно к магнитному полю (σ -компоненты). Таково объяснение наблюдаемого Зееманом нормального триплета в поперечном эффекте.

В направлении вдоль магнитного поля компонента с частотой ν излучаться не будет вследствие поперечности световых волн (поскольку заряд не излучает при движении вдоль линий поля), две другие компоненты с $\nu + \Delta\nu$ и $\nu - \Delta\nu$ представятся в виде поляризованного по кругу света правого и левого вращения. При этом в случае отрицательного знака заряда e левая поляризация обнаруживается у линии уменьшенной частоты (красная компонента) (см. рис. 4, б), а правая – у линии увеличенной частоты (фиолетовая компонента) (см. рис. 4, а).

Если электрон двигается по круговой орбите радиуса r , то по второму закону Ньютона действующая на него кулоновская сила является центростремительной

$$m_e \omega^2 r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (2)$$

где ω — круговая частота электрона в отсутствие магнитного поля.

При наложении магнитного поля центростремительная сила для круговых движений изменится вследствие добавления силы Лоренца, и мы имеем соответственно для правого и левого круга

$$\begin{aligned} a) m_e \omega_p^2 r &= m_e \omega^2 r + e\nu B; \\ b) m_e \omega_l^2 r &= m_e \omega^2 r - e\nu B, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_p и ω_l — круговые частоты электрона для правого и левого круговых движений при наложении магнитного поля.

Линейные скорости движения электрона соответственно $v_p = \omega_p r$ и $v_l = \omega_l r$, поэтому уравнения (3) запишутся как

$$\begin{aligned} a) \omega_p^2 - \frac{eB}{m_e} \omega_p - \omega^2 &= 0; \\ b) \omega_l^2 + \frac{eB}{m_e} \omega_l - \omega^2 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Это квадратные уравнения относительно частот ω_p и ω_l , и их решения имеют вид

$$\begin{aligned}
a) \omega_n &= \frac{e}{2m_e} B \pm \omega \sqrt{1 + \left(\frac{eB}{2m_e \omega} \right)^2}; \\
b) \omega_{\lambda} &= -\frac{e}{2m_e} B \pm \omega \sqrt{1 + \left(\frac{eB}{2m_e \omega} \right)^2}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Поскольку величина $e/2me = 8.8 \cdot 10^6$ (в системе СИ), тогда $eB/2me = 8.8 \cdot 10^6 \cdot B \sim 10^{12}$ рад/с при полях с магнитной индукцией $B \sim 10$ Тл. Между тем ω для спектральных линий, лежащих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, имеет порядок величины 10^{15} рад/с. Следовательно, выполняется условие $eB/me \ll \omega$. Пренебрегая под радикалом членом $(eB/2me\omega)^2$ по сравнению с 1, получим

$$\begin{aligned}
\omega_n &= \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} B \pm \omega \\
\omega_{\lambda} &= -\frac{1}{2} \frac{e}{m_e} B \pm \omega.
\end{aligned} \tag{6}$$

Поделим обе части каждого из равенств (6) на 2π

$$\begin{aligned}
\frac{\omega_n}{2\pi} &= \frac{1}{2 \cdot 2\pi} \frac{e}{m_e} B \pm \frac{\omega}{2\pi} \\
\frac{\omega_{\lambda}}{2\pi} &= -\frac{1}{2 \cdot 2\pi} \frac{e}{m_e} B \pm \frac{\omega}{2\pi}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Так как $\nu = \omega/2\pi$ есть линейная частота излучения, и учитывая, что она не может быть отрицательной, из четырех уравнений имеем

$$\begin{aligned}
a) \nu_n &= \nu + \frac{1}{4\pi} \left(\frac{e}{m_e} \right) B; \\
b) \nu_{\lambda} &= \nu - \frac{1}{4\pi} \left(\frac{e}{m_e} \right) B.
\end{aligned} \tag{8}$$

В шкале длин волн величина расщепления спектральных линий в магнитном поле выражается формулой

$$\Delta\lambda = \pm \frac{e\lambda^2 B}{4\pi m_e c} \quad (9)$$

Объясняемый электронной теорией Лоренца простой эффект Зеемана наблюдается лишь для одиночных, или так называемых «синглетных» спектральных линий.

Схема установки

Установка для изучения эффекта Зеемана (рис. 5) состоит из магнита (1), между полюсами которого находится источник света, идеального спектрометра (2), системы линз (3), пластины (4) поляроида (5), фотоприемника (6) и окуляра спектрометра (7).

Измерения

Задание 1. Зажгите спектральную лампу нажатием кнопки «Старт». В появившемся спектре найдите подходящую для изучения линию (579 нм). Несколько последовательных нажатий кнопки «Разрешение спектрометра» позволят увидеть на экране спектр в увеличенном масштабе. Регулируя величину тока, протекающего через обмотку магнита, качественно исследуйте зависимость расщепления спектральной линии от величины магнитной индукции при максимальном разрешении спектрометра. Опишите наблюдаемые результаты эксперимента.

Задание 2. При максимальном разрешении измерьте величину расщепления для 6–10 значений индукции магнитного поля. Величина индукции и сила тока связаны соотношением: $B = 0.2 \cdot (I - I^2/24)$ Тл (ток в А). Полученные результаты оформите в таблицу. Постройте в тетради график полученной зависимости. Методом наименьших квадратов определите удельный заряд электрона из проведенных измерений.

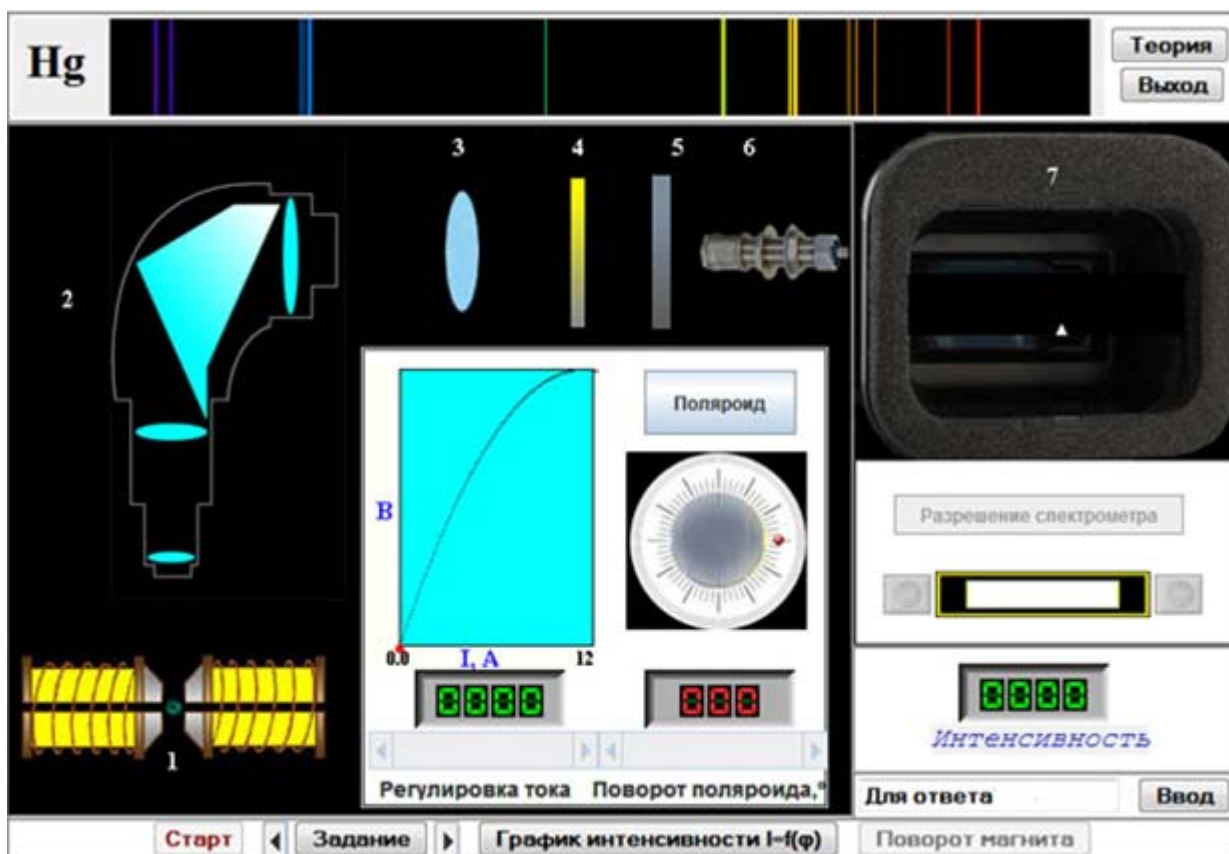


Рис. 5. Схема установки

Задание 3. При максимальных значениях индукции поля и разрешения исследуйте поляризацию отдельных компонент линии. (Установите поляроид, нажав соответствующую кнопку, и вращайте его.) Опишите наблюдаемое явление с качественной стороны. Какие предположения можно высказать по поводу наблюдаемых явлений?

Задание 4. Постройте графики экспериментальной и теоретической зависимости интенсивности света от угла поворота поляроида для каждой компоненты (на миллиметровой бумаге в полярных координатах). Для этого измерьте интенсивности для углов поворота поляроида от 0 до 360 градусов с шагом 10 градусов. Чем отличается график для центральной компоненты от графиков для крайних компонент линии? Чем вызвано это отличие?

Задание 5. Поверните магнит так, чтобы в спектрометр попадало излучение, испущенное вдоль направления индукции магнитного поля. Прodelайте те же измерения, что и для поперечного случая. Объясните различие в результатах.

Задание 6. Чтобы выяснить поляризацию компонент для продольного случая, установите на пути пучка дополнительно пластинку $\lambda/4$. Измерьте и постройте график интенсивности $I = f(\varphi)$. Какие выводы можно сделать из этого эксперимента?

Задание 7. Определите индукцию магнитного поля в солнечных образованиях (в Тл) по наблюдаемому расщеплению линий $\Delta\lambda$ в этом поле. Проверьте полученный вами ответ.

Задание 8. Определите (в микронах) минимальную толщину пластинки $\lambda/4$ для наблюдаемой длины волны спектральной линии, если разность показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей составляет Δn . Проверьте полученный вами ответ.

Сделайте выводы по результатам работы.

Ответьте на контрольные вопросы по выбору преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Какой свет называют плоско-поляризованным?
2. Что представляет собой оптическая ось в кристалле? Какие плоскости называют главными?
3. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
4. Как устроена призма Николя?
5. Как получить круговую и эллиптическую поляризацию света?
6. Как осуществляется поляризация света в поляроидных пленках?
7. Что собой представляет пластинка?
8. Какова роль пластинки в данной работе?
9. За счет чего увеличивается кинетическая энергия движения электрона в магнитном поле, ведь сила Лоренца работы не совершает?
10. Как находят направление силы Лоренца? От чего оно зависит?
11. Как называется свет со всевозможными равновероятными ориентациями светового вектора?
12. Какие виды поляризованного света вы знаете? Чем они отличаются друг от друга?

13. Расскажите о способах получения поляризованного света.

Библиографический список

1. **Солоухин, Р.И.** Оптика и атомная физика [Текст] / Р.И. Солоухин. – Новосибирск : Наука, 1983.
2. **Ландсберг, Г.С.** Оптика [Текст] / Г.С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976.
3. **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики. Т. 4 [Текст] / Д.В. Сивухин. – М. : Наука, 1980.
4. **Савельев, И.В.** Курс общей физики. Т. 2 [Текст] / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1978.